(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 114040478 B
(45)授权公告日 2024.12.31

(21)申请号 202111271506.2
(22)申请日 2021.10.29
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114040478 A
(43)申请公布日 2022.02.11
(73)专利权人 清华大学
地址 100084 北京市海淀区双清路30号清华大学
(72)发明人 刘坤璨 戴凌龙 张子健 许慎恒 杨帆
(74)专利代理机构 北京路浩知识产权代理有限公司 11002
专利代理师 郭亮
(51)Int.Cl.
H04W 52/02(2009.01)
H04W 52/26(2009.01)
(56)对比文件
US 2005122273 A1,2005.06.09
Nhan Thanh Nguyen等.Spectral Efficiency Optimization for Hybrid Relay-Reflecting Intelligent Surface.2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops).2021,正文第II-IV节.
审查员 张彩霞

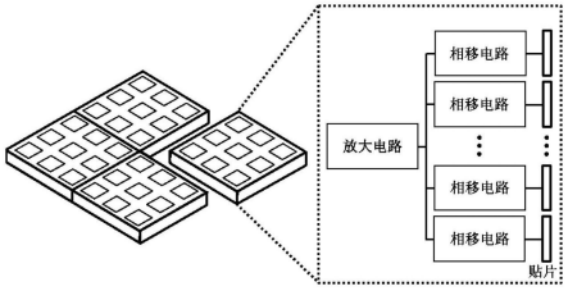
权利要求书2页 说明书10页 附图3页

(54)发明名称

低功耗的智能超表面硬件结构、预编码方法及装置

(57)摘要

本发明提供一种低功耗的智能超表面硬件结构、预编码方法及装置,该硬件结构包括:多个子阵列、与每个子阵列一一对应的放大电路,以及与每个RIS单元对应的相移电路;其中,每个子阵列包括多个RIS单元,每个子阵列的不同RIS单元共用一个放大电路,每个RIS单元分别使用不同相移电路。该硬件结构通过由多个RIS单元构成的子阵列共用一个放大电路,有效解决有源RIS由于引入大量有源放大电路而带来的高功耗问题,相比传统全连接结构,本发明的智能超表面硬件结构可以获得显著的能效提升。其预编码方法以最大化系统能效为目标,优化了子连接有源RIS放大控制与相移控制,能够有效节省因大量放大电路消耗的系统能量。



CN 114040478 B

1.一种基于低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法,其特征在于,所述低功耗的智能超表面硬件结构,包括:

多个子阵列、与每个子阵列一一对应的放大电路,以及与每个智能超表面RIS单元对应的相移电路;

其中,每个子阵列包括多个RIS单元,每个子阵列的不同RIS单元共用一个放大电路,每个RIS单元分别使用不同相移电路,每一所述子阵列对信号幅度的控制采用相同的信号放大系数,每一所述RIS单元对信号相位进行独立的控制;

所述预编码方法包括:

基于预调节每一相移电路的相位以及每一放大电路的放大系数,以实现波束赋形的预编码;

以基站和RIS的最大功率为约束条件,确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果,作为对应的预编码方案;

其中,所述系统为用户终端、RIS和基站构成的系统,所述系统能效根据系统频谱效率和系统总功耗的比值确定;

所述确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果,作为对应的预编码方案,包括:

S1.使用分式型优化丁克尔巴赫算法将系统能效优化问题转化为有理式规划问题;

S2.使用拉格朗日对偶方法引入辅助变量,将有理式规划问题转化为凸优化问题;

S3.保持其他变量不变,按顺序依次优化辅助变量、基站波束赋形、有源RIS放大控制与相移控制变量;

S4.重复S3,直至目标函数收敛;

S5.重复S2-S4,直至目标函数收敛至0,此时得到的预编码方案为最大化系统能效的有源RIS预编码方案;

所述确定使系统能效最大化的所有相移电路和放大电路的调节结果之前,还包括根据如下公式确定系统总功耗:

$$P=\xi\sum_{k=1}^{K}\|\boldsymbol{w}_k\|^2+\zeta\left(\sum_{k=1}^{K}\left\|\boldsymbol{\Psi G w}_k\right\|^2+\|\boldsymbol{\Psi}\|^2\sigma_z^2\right)+KW_U+W_{BS}$$

$$+NW_{PS}+LW_{PA},$$

其中,ξ和ζ表示基站和有源RIS能量转换系数的倒数,W_U和W_{BS}表示用户终端和基站的静态功耗,W_{PS}和W_{PA}表示相移电路和放大电路的静态功耗;K为基站服务的用户数,k表示相应的单个用户,$\boldsymbol{w}_k\in\mathbb{C}^{M\times1}$表示基站波束赋形向量,M为基站天线数;Ψ=diag(Θ Γ a)表示有源RIS的波束赋形矩阵;$\boldsymbol{\Theta}\in\mathbb{C}^{N\times N}$表示对角相移矩阵,$a\in\mathbb{R}_+^{L\times1}$表示放大系数向量;$\boldsymbol{\Gamma}\in\mathbb{C}^{N\times L}$表示放大电路和相移电路的连接关系;$\boldsymbol{G}\in\mathbb{C}^{N\times M}$表示基站和有源RIS之间的信道;N为RIS单元总数,L表示放大电路数量;σ_z^2为有源RIS引入的动态噪声的参数。

2.根据权利要求1所述的低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法,其特征在于,所述确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果之前,还包括:

根据所有用户终端处解调信号的信噪比,确定系统频谱效率。

3.根据权利要求2所述的低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法,其特征在于,所述根据所有用户终端处解调信号的信噪比,确定系统频谱效率之前,还包括,根据下式确定每一用户终端处解调信号的信噪比:

$$\mathrm{SINR}_k=\frac{\left|\boldsymbol{H}_k^H\boldsymbol{w}_k\right|^2}{\sum_{j=1,j\neq k}^{K}\left|\boldsymbol{H}_k^H\boldsymbol{w}_j\right|^2+\left\|\boldsymbol{f}_k^H\boldsymbol{\Psi}\right\|^2\sigma_z^2+\sigma^2};$$

其中,K为基站服务的用户数,j、k表示相应的单个用户;$\boldsymbol{H}_k^H=\boldsymbol{h}_k^H+\boldsymbol{f}_k^H\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{G}$表示基站到用户k的等效信道;Ψ=diag(Θ Γ a)表示有源RIS的波束赋形矩阵;$\boldsymbol{\Theta}\in\mathbb{C}^{N\times N}$表示对角相移矩阵,$\boldsymbol{a}\in\mathbb{R}_{+}^{L\times 1}$表示放大系数向量,N为RIS单元总数,L表示放大电路数量;$\boldsymbol{\Gamma}\in\mathbb{C}^{N\times L}$表示放大电路和相移电路的连接关系;$\boldsymbol{h}_k\in\mathbb{C}^{M\times 1}$, $\boldsymbol{G}\in\mathbb{C}^{N\times M}$和$\boldsymbol{f}_k\in\mathbb{C}^{N\times 1}$分别表示基站和用户k、基站和有源RIS、以及有源RIS和用户k之间的信道;$\boldsymbol{w}_j$、$\boldsymbol{w}_k\in\mathbb{C}^{M\times 1}$表示基站波束赋形向量;$\sigma_z^2$、^{2}分σ分别为有源RIS引入的动态噪声和用户处的加性高斯白噪声的参数。

4.一种基于低功耗的智能超表面硬件结构的预编码装置,应用权利要求1-3中任一项所述的基于低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法,其特征在于,包括:

分配模块,用于基于预调节每一相移电路的相位以及每一放大电路的放大系数,以实现波束赋形的预编码;

处理模块,用于以基站和RIS的最大功率为约束条件,确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果,作为对应的预编码方案;

其中,所述系统为用户终端、RIS和基站构成的系统。

5.一种电子设备,包括存储器、处理器及存储在所述存储器上并可在所述处理器上运行的计算机程序,其特征在于,所述处理器执行所述程序时实现如权利要求1至3任一项所述低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法的步骤。

6.一种非暂态计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,其特征在于,所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至3任一项所述低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法的步骤。

低功耗的智能超表面硬件结构、预编码方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及无线通信领域,尤其涉及一种低功耗的智能超表面硬件结构、预编码方法及装置。

背景技术

[0002] 智能超表面(Reconfigurable Intelligent Surface,RIS)被认为是未来6G通信的备选关键技术之一。如图1的a部分所示,RIS是由大量可调控信号相位的无源单元组成的大规模阵列,可以对入射信号进行智能调控,使其能够以高增益反射到任意指定方向上。由于RIS的成本和功耗都很低,它在克服中断、提升容量、节省发射功率等场景中都存在应用价值。

[0003] 如图2所示,RIS的引入带来了“乘性路损效应”,即发射机-RIS-接收机链路的路损是两段信道路损的乘积(而不是加和),这会使得其增益远远小于直射链路增益。这一“乘性路损效应”进而使得RIS在直射链路较强的场景中难以体现出明显优势而出现了致命的问题。为了克服“乘性路损效应”,一项名为有源RIS的新技术被提出,它可以在无论直射链路强或弱的场景下都能提高容量。具体而言,如图1的b部分所示,与传统无源RIS对信号只进行相位调控不同,有源RIS还在每个单元的相移电路之外集成了一个放大电路,使得RIS可以对反射信号进行放大,进一步使得乘性路损转化为加性路损。

[0004] 然而,现有的有源RIS结构是一种每个单元集成独立的相移电路和放大电路的全连接结构,这使得有源RIS的功耗会随着单元数的增加而大大提高。以每个放大电路消耗静态功率10mW为例,一个1000单元的有源RIS仅在放大电路的静态功耗就要消耗10W,这已经可以和一个典型基站的发射功率相比拟,在实际部署中是难以接受的。因此,有源RIS需要不同于全连接结构的新结构来节省功耗。

发明内容

[0005] 针对现有技术存在的问题,本发明提供一种低功耗的智能超表面硬件结构、预编码方法及装置。

[0006] 本发明提供一种低功耗的智能超表面硬件结构,包括:多个子阵列、与每个子阵列一一对应的放大电路,以及与每个智能超表面RIS单元对应的相移电路;其中,每个子阵列包括多个RIS单元,每个子阵列的不同RIS单元共用一个放大电路,每个RIS单元分别使用不同相移电路。

[0007] 本发明还提供一种基于上述低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法,包括:基于预调节每一相移电路的相位以及每一放大电路的放大系数,以实现波束赋形的预编码;以基站和RIS的最大功率为约束条件,确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果,作为对应的预编码方案;其中,所述系统为用户终端、RIS和基站构成的系统。

[0008] 根据本发明一个实施例的低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法,所述系统

能效根据系统频谱效率和系统总功耗的比值确定。

[0009] 根据本发明一个实施例的低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法,所述确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果之前,还包括:根据所有用户终端处解调信号的信噪比,确定系统频谱效率。

[0010] 根据本发明一个实施例的低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法,所述根据所有用户终端处解调信号的信噪比,确定系统频谱效率之前,还包括,根据下式确定每一用户终端处解调信号的信噪比:

[0011] $$\mathrm{SINR}_k = \frac{\left|\boldsymbol{H}_k^H \boldsymbol{w}_k\right|^2}{\sum_{j=1,j\neq k}^{K}\left|\boldsymbol{H}_k^H \boldsymbol{w}_j\right|^2 + \left\|\boldsymbol{f}_k^H \boldsymbol{\Psi}\right\|^2 \sigma_z^2 + \sigma^2};$$

[0012] 其中,K为基站服务的用户数,j、k表示相应的单个用户;$\boldsymbol{H}_k^H = \boldsymbol{h}_k^H + \boldsymbol{f}_k^H \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{G}$表示基站到用户k的等效信道;Ψ=diag(Θ Γ a)表示有源RIS的波束赋形矩阵;$\boldsymbol{\Theta} \in \mathbb{C}^{N\times N}$表示对角相移矩阵,$a \in \mathbb{R}_+^{L\times 1}$表示放大系数向量,N为RIS单元总数,L表示放大电路数量;$\boldsymbol{\Gamma} \in \mathbb{C}^{N\times L}$表示放大电路和相移电路的连接关系;$\boldsymbol{h}_k \in \mathbb{C}^{M\times 1}$,$\boldsymbol{G} \in \mathbb{C}^{N\times M}$和$\boldsymbol{f}_k \in \mathbb{C}^{N\times 1}$分别表示基站和用户k、基站和有源RIS、以及有源RIS和用户k之间的信道,M为基站天线数;$\boldsymbol{w}_j$、$\boldsymbol{w}_k \in \mathbb{C}^{M\times 1}$表示基站波束赋形向量;$\sigma_z^2$、$\sigma^2$分别为有源RIS引入的动态噪声和用户处的加性高斯白噪声的参数。

[0013] 根据本发明一个实施例的低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法,所述确定使系统能效最大化的所有相移电路和放大电路的调节结果之前,还包括根据如下公式确定系统总功耗:

[0014] $$P = \xi \sum_{k=1}^{K} \|\boldsymbol{w}_k\|^2 + \zeta\left(\sum_{k=1}^{K}\left\|\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{G}\boldsymbol{w}_k\right\|^2 + \|\boldsymbol{\Psi}\|^2 \sigma_z^2\right) + KW_U + W_{BS} + NW_{PS} + LW_{PA},$$

[0015] 其中,ξ和ζ表示基站和有源RIS能量转换系数的倒数,W_U和W_{BS}表示用户终端和基站的静态功耗,W_{PS}和W_{PA}表示相移电路和放大电路的静态功耗;K为基站服务的用户数,k表示相应的单个用户,$\boldsymbol{w}_k \in \mathbb{C}^{M\times 1}$表示基站波束赋形向量;Ψ=diag(Θ Γ a)表示有源RIS的波束赋形矩阵;$\boldsymbol{\Theta} \in \mathbb{C}^{N\times N}$表示对角相移矩阵,$a \in \mathbb{R}_+^{L\times 1}$表示放大系数向量;$\boldsymbol{\Gamma} \in \mathbb{C}^{N\times L}$表示放大电路和相移电路的连接关系;$\boldsymbol{G} \in \mathbb{C}^{N\times M}$表示基站和有源RIS之间的信道;N为RIS单元总数,L表示放大电路数量;σ_z^2为有源RIS引入的动态噪声的参数。

[0016] 根据本发明一个实施例的低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法,所述确定

使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果,作为对应的预编码方案,包括:

[0017] S1.使用分式型优化丁克尔巴赫算法将系统能效优化问题转化为有理式规划问题;

[0018] S2.使用拉格朗日对偶方法引入辅助变量,将有理式规划问题转化为凸优化问题;

[0019] S3.保持其他变量不变,按顺序依次优化辅助变量、基站波束赋形、有源RIS放大控制与相移控制变量;

[0020] S4.重复S3,直至目标函数收敛;

[0021] S5.重复S2-S4,直至目标函数收敛至0,此时得到的预编码方案为最大化系统能效的有源RIS预编码方案。

[0022] 本发明还提供一种低功耗的智能超表面硬件结构的预编码装置,包括:分配模块,用于基于预调节每一相移电路的相位以及每一放大电路的放大系数,以实现波束赋形的预编码;处理模块,用于以基站和RIS的最大功率为约束条件,确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果,作为对应的预编码方案;其中,所述系统为用户终端、RIS和基站构成的系统。

[0023] 本发明还提供一种电子设备,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述程序时实现如上述任一种所述低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法的步骤。

[0024] 本发明还提供一种非暂态计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该计算机程序被处理器执行时实现如上述任一种所述低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法的步骤。

[0025] 本发明提供的低功耗的智能超表面硬件结构、预编码方法及装置,通过由多个RIS单元构成的子阵列共用一个放大电路,有效解决有源RIS由于引入大量有源放大电路而带来的高功耗问题。相比传统全连接结构,本发明的智能超表面硬件结构可以获得显著的能效提升,可作为有源RIS的一种高能效实现方式。

附图说明

[0026] 为了更清楚地说明本发明或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作一简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0027] 图1是现有技术的无源RIS与全连接有源RIS的结构示意图;

[0028] 图2是现有技术的RIS辅助的MIMO系统结构示意图;

[0029] 图3是本发明提供的低功耗的智能超表面硬件结构示意图;

[0030] 图4是本发明提供的低功耗的智能超表面硬件结构及其预编码方法的能效性能示意图;

[0031] 图5是本发明提供的低功耗的智能超表面硬件结构预编码装置的结构示意图;

[0032] 图6是本发明提供的电子设备的结构示意图。

具体实施方式

[0033] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明中的附图,对本发明中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有作出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0034] 下面结合图1-图6描述本发明的低功耗的智能超表面硬件结构、预编码方法及装置。图3是本发明提供的低功耗的智能超表面硬件结构示意图,如图3所示,本发明提供低功耗的智能超表面硬件结构,包括:多个子阵列、与每个子阵列一一对应的放大电路,以及与每个智能超表面RIS单元对应的相移电路;其中,每个子阵列包括多个RIS单元,每个子阵列的不同RIS单元共用一个放大电路,每个RIS单元分别使用不同相移电路。

[0035] 目前已有的全连接有源RIS结构如图2的b部分所示,它在原有如图2的a部分的无源RIS基础之上,每个单元包括了一个独立的相移电路外的独立的放大电路。然而当RIS单元数目很大时,全连接结构会因为使用了大量的有源放大电路而面临很高的功耗问题。

[0036] 为了解决有源RIS现有全连接结构的高功耗问题,本发明所提出的如图3所示的子连接结构中,多个RIS单元被划分为一个子阵列,子阵列中的每个单元采用了独立的相移电路,但共用一个放大电路,也即每个单元对信号独立的进行相位控制,但整个子阵列对信号的幅度控制采用相同的信号放大系数。

[0037] 为方便对比,考虑每个子阵列包含T个RIS单元,也即一个放大电路同时服务T个RIS单元。此时,全连接结构变为了子连接结构在T=1时的一个特殊情况。在相同RIS单元数的情况下,子连接有源RIS的放大电路数量变为全连接结构下的1/T,使得有源RIS能耗大大降低。同时,子连接有源RIS在波束赋形过程中的自由度也因为T个RIS单元共用相同的放大系数而随之降低。然而,本发明表明,子连接有源RIS结构波束赋形自由度的降低影响较小,系统仍能因为使用子连接结构而获得能效的大幅提升。

[0038] 本发明提供的低功耗的智能超表面硬件结构,通过由多个RIS单元构成的子阵列共用一个放大电路,有效解决有源RIS由于引入大量有源放大电路而带来的高功耗问题。相比传统全连接结构,本发明的智能超表面硬件结构可以获得显著的能效提升,可作为有源RIS的一种高能效实现方式。

[0039] 基于本发明提出的低功耗的智能超表面硬件结构,本发明还提出了对应的预编码方法,包括:基于预调节每一相移电路的相位以及每一放大电路的放大系数,以实现波束赋形的预编码;以基站和RIS的最大功率为约束条件,确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果,作为对应的预编码方案;其中,所述系统为用户终端、RIS和基站构成的系统。

[0040] 具体而言,以最大化系统能效为目标,通过调节每个子阵列放大电路的放大系数,和每一个相移电路的相位,实现系统能效最大。当然,此过程中,基站和有源RIS的功率不超过最大功率。

[0041] 本发明所提的低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法,能够有效节省因大量放大电路消耗的系统能量,有效提升系统能效。

[0042] 在上述方法实施例中,所述系统能效根据系统频谱效率和系统总功耗的比值确定。

[0043] 具体地,系统能效可以表示为:

[0044] $$\eta = \frac{R}{P}$$

[0045] 其中,R为系统频谱效率,P为系统总功耗。在预编码方案中,本发明的优化目标为最大化系统能效。

[0046] 在上述方法实施例中,所述确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果之前,还包括:根据所有用户终端处解调信号的信噪比,确定系统频谱效率。

[0047] 具体地,系统频谱效率可确定如下:

[0048] $$R = \sum_{k=1}^{K} \log_2(1 + \mathrm{SINR}_k)$$

[0049] 其中,K为基站服务的用户数;SINR_k为用户k处解调信号的SINR。

[0050] 在上述方法实施例中,所述根据所有用户终端处解调信号的信噪比,确定系统频谱效率之前,还包括,根据下式确定每一用户终端处解调信号的信噪比:

[0051] $$\mathrm{SINR}_k = \frac{\left|\boldsymbol{H}_k^H \boldsymbol{w}_k\right|^2}{\sum_{j=1,j\neq k}^{K}\left|\boldsymbol{H}_k^H \boldsymbol{w}_j\right|^2 + \left\|\boldsymbol{f}_k^H \boldsymbol{\Psi}\right\|^2 \sigma_z^2 + \sigma^2};$$

[0052] 其中,K为基站服务的用户数,j、k表示相应的单个用户;$\boldsymbol{H}_k^H = \boldsymbol{h}_k^H + \boldsymbol{f}_k^H \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{G}$表示基站到用户k的等效信道;Ψ=diag(ψ)=diag(Θ Γ a)表示有源RIS的波束赋形矩阵;,N为RIS单元总数,L表示放大电路数量;$\boldsymbol{h}_k \in \mathbb{C}^{M\times 1}$, $\boldsymbol{G} \in \mathbb{C}^{N\times M}$和$\boldsymbol{f}_k \in \mathbb{C}^{N\times 1}$分别表示基站和用户k、基站和有源RIS、以及有源RIS和用户k之间的信道,M为基站天线数;$\boldsymbol{w}_k \in \mathbb{C}^{M\times 1}$表示基站波束赋形向量。

[0053] 具体而言,考虑N单元有源RIS辅助的MIMO系统,其中一个M天线基站同时服务K个单天线用户。对于全连接和子连接两种结构,用L=N/T表示需要的放大电路数量,则有源RIS的波束赋形矩阵可表示为:

[0054] Ψ=diag(ψ)=diag(Θ Γ a),

[0055] 其中,$\boldsymbol{\Theta} \in \mathbb{C}^{N\times N}$表示与传统无源RIS相同的对角相移矩阵,$\boldsymbol{a} \in \mathbb{R}_{+}^{L\times 1}$表示放大系数向量。$\boldsymbol{\Gamma} \in \mathbb{C}^{N\times L}$定义为一个示性矩阵,它用来表示放大电路和相移电路的连接关系。不失一般性,令$\boldsymbol{\Gamma} = \boldsymbol{I}_L \otimes \boldsymbol{1}_T$,其中⊗表示克罗内克乘积,$\boldsymbol{1}_T \in \mathbb{C}^{T\times 1}$表示全1向量。

[0056] 则用户k收到的信号y_k可以被表示为:

[0057] $$y_k = \left(\boldsymbol{h}_k^H + \boldsymbol{f}_k^H \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{G}\right) \sum_{j=1}^{K} \boldsymbol{w}_j s_j + \boldsymbol{f}_k^H \boldsymbol{\Psi} \boldsymbol{z} + n_k,$$

[0058] 其中，s_k表示传输给用户k的归一化符号，$\boldsymbol{w}_k \in \mathbb{C}^{M\times 1}$表示相应的基站波束赋形向量，$\boldsymbol{z} \sim \mathcal{CN}\left(\boldsymbol{0}_N, \sigma_z^2 \boldsymbol{I}_N\right)$和$n \sim \mathcal{CN}\left(0, \sigma^2\right)$分别表示有源RIS引入的动态噪声和用户k处的加性高斯白噪声。

[0059] 在上述方法实施例中，所述确定使系统能效最大化的所有相移电路和放大电路的调节结果之前，还包括根据如下公式确定系统总功耗：

[0060] $$P = \xi \sum_{k=1}^{K} \|\boldsymbol{w}_k\|^2 + \zeta\left(\sum_{k=1}^{K} \left\|\boldsymbol{\Psi G w}_k\right\|^2 + \|\boldsymbol{\Psi}\|^2 \sigma_z^2\right) + KW_U + W_{BS} + NW_{PS} + LW_{PA},$$

[0061] 其中，ξ和ζ表示基站和有源RIS能量转换系数的倒数，W_U和W_{BS}表示用户终端和基站的静态功耗，W_{PS}和W_{PA}表示相移电路和放大电路的静态功耗。

[0062] 对于系统的功耗，它由基站和有源RIS的发射功率，以及系统各个组件的静态功率共同组成，系统总功耗可以表示为上式。

[0063] 综合上述信号模型，记$\boldsymbol{W} = [\boldsymbol{w}_1^T, \cdots, \boldsymbol{w}_K^T]^T$以及Θ＝diag(θ)，则系统能效最大化问题可以表示为：

[0064] $$\max_{\boldsymbol{W},\boldsymbol{\Theta},\boldsymbol{a}} \ \eta = \frac{R}{P}$$

[0065] $$\text{s.t.}C_1: \xi \sum_{k=1}^{K} \|\boldsymbol{w}_k\|^2 + W_{BS} \le P_{BS}^{max}$$

[0066] $$C_2: \zeta\left(\sum_{k=1}^{K} \left\|\boldsymbol{\Psi G w}_k\right\|^2 + \|\boldsymbol{\Psi}\|^2 \sigma_z^2\right) + NW_{BS} + LW_{PA} \le P_{RIS}^{max}$$

[0067] $$C_3: |\theta_n| = 1, \forall n \in \{1, \cdots, N\}$$

[0068] $$C_4: a_l \ge 0, \forall l \in \{1, \cdots, L\}$$

[0069] 其中，约束C_1和C_2分别限制了基站和有源RIS的最大功率，约束C_3和C_4分别限制了相移控制Θ和放大控制a的可行集。

[0070] 对上述优化问题进行求解，便可得到所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果，即对应的预编码方案。

[0071] 在一个方法实施例中，所述确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果，作为对应的预编码方案，包括：S1.使用分式型优化丁克尔巴赫算法将系统能效优化问题转化为有理式规划问题；S2.使用拉格朗日对偶方法引入辅助变量，将有理式规划问题转化为凸优化问题；S3.保持其他变量不变，按顺序依次优化辅助变量、基站波束赋形、有源RIS放大控制与相移控制变量；S4.重复S3，直至目标函数收敛；S5.重复S2-S4，直至目标函数收敛至0，此时得到的预编码方案为最大化系统能效的有源RIS预编码

方案。具体说明如下：

[0072] 为了便于处理上述的分式型目标函数，本发明实施例首先采用分式规划中的丁克尔巴赫算法将其转换为有理式形式。具体而言，最优能效η^{opt}满足：

[0073] $$\max_{\boldsymbol{W},\boldsymbol{\Theta},\boldsymbol{a}}(R-\eta^{\mathrm{opt}}P)=0,$$

[0074] 说明最优能效η^{opt}可以通过迭代求解下面的问题而获得：

[0075] $$\max_{\boldsymbol{W},\boldsymbol{\Theta},\boldsymbol{a}}\ f(\boldsymbol{W},\boldsymbol{\Theta},\boldsymbol{a})=R-\eta P$$

[0076] s.t.C_1,C_2,C_3,C_4.

[0077] 由于此问题仍然具有非凸性，本发明引入辅助变量$\boldsymbol{\mu}\in\mathbb{C}^{K\times 1}$和$\boldsymbol{\nu}\in\mathbb{C}^{K\times 1}$将问题等价改写为：

[0078] $$\max_{\boldsymbol{W},\boldsymbol{\Theta},\boldsymbol{a}}\ g(\boldsymbol{W},\boldsymbol{\Theta},\boldsymbol{a},\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\nu})$$

[0079] s.t.C_1,C_2,C_3,C_4.

[0080] 其中：

[0081] $$\begin{aligned}&g(\boldsymbol{W},\boldsymbol{\Theta},\boldsymbol{a},\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{\nu})\\&=\sum_{k=1}^{K}\left[\ln(1+\mu_k)-\mu_k+2\sqrt{1+\mu_k}\mathrm{Re}\{\nu_k^*\boldsymbol{H}_k^H\boldsymbol{w}_k\}\right.\\&\left.-|\nu_k|^2\left(\sum_{j=1}^{K}\left|\boldsymbol{H}_k^H\boldsymbol{w}_j\right|^2+\left\|\boldsymbol{f}_k^H\boldsymbol{\Psi}\right\|^2\sigma_z^2+\sigma^2\right)\right]-\eta P.\end{aligned}$$

[0082] 此时，问题中所有变量的最优解都可以通过迭代优化获得。本发明所提出的预编码方案中，各个变量的优化是在其他变量固定时取到的最优解，具体的闭式表达式如下。

[0083] (1)最优辅助变量：对于所有k∈{1,…,K}，令$\partial g/\partial\mu_k$和$\partial g/\partial\nu_k$为0得到最优解：

[0084] $$\mu_k^{\mathrm{opt}}=\frac{\rho_k}{2}\left(\rho_k+\sqrt{\rho_k^2+4}\right),$$

[0085] $$\nu_k^{\mathrm{opt}}=\frac{\sqrt{1+\mu_k}\boldsymbol{H}_k^H\boldsymbol{w}_k}{\sum_{j=1}^{K}\left|\boldsymbol{H}_k^H\boldsymbol{w}_j\right|^2+\left\|\boldsymbol{f}_k^H\boldsymbol{\Psi}\right\|^2\sigma_z^2+\sigma^2},$$

[0086] 其中$\rho_k=\mathrm{Re}\{\nu_k^*\boldsymbol{H}_k^H\boldsymbol{w}_k\}$。

[0087] (2)最优基站波束赋形：定义：

[0088] $$\tilde{P}_{BS}^{max}=\xi^{-1}(P_{BS}^{max}-W_{BS}),$$

[0089] $$\tilde{P}_{RIS}^{max}=\zeta^{-1}(P_{RIS}^{max}-NW_{PS}-LW_{PA})$$

[0090] 分别为基站和有源RIS的发射功率。对于最优基站波束赋形，问题可以写为：

[0091] $$\max_{\boldsymbol{W}}\ \mathrm{Re}\{\boldsymbol{u}^H\boldsymbol{W}\}-\boldsymbol{W}^H\boldsymbol{S}\boldsymbol{W}$$

[0092] s.t.C_1:$\boldsymbol{W}^H\boldsymbol{S}\boldsymbol{W} \le \tilde{P}_{BS}^{max}$

[0093] C_2:$\boldsymbol{W}^H\boldsymbol{T}\boldsymbol{W} \le \tilde{P}_{RIS}^{max} - \left\|\boldsymbol{f}_k^H\boldsymbol{\Psi}\right\|^2\sigma_z^2$

[0094] 其中:

[0095] $$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{I}_K \otimes \left(\eta\xi\boldsymbol{I}_M + \eta\xi\boldsymbol{G}^H\boldsymbol{\Psi}^H\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{G} + \sum_{k=1}^{K}|v_k|^2\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{H}_k^H\right),$$

[0096] $$\boldsymbol{u} = [\boldsymbol{u}_1^T,\cdots,\boldsymbol{u}_K^T]^T,\ \ \boldsymbol{u}_k = 2\sqrt{1+\mu_k}v_k\boldsymbol{H}_k,$$

[0097] $$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{I}_K \otimes (\boldsymbol{G}^H\boldsymbol{\Psi}^H\boldsymbol{\Psi}\boldsymbol{G}).$$

[0098] 这是一个标准的QCQP(quadratic constraint quadratic programming,二次型规划)问题,因此可以被现有的ADMM(alternating direction method of multipliers)等方法解决。

[0099] (3)最优有源RIS波束赋形:定义$\alpha_{k,j} = \boldsymbol{h}_k^H\boldsymbol{w}_j$以及$\beta_j$=$Gw_j$,则$\boldsymbol{H}_k^H\boldsymbol{w}_j$可以被改写为:

[0100] $$\boldsymbol{H}_k^H\boldsymbol{w}_j = \alpha_{k,j} + \boldsymbol{f}_k^H\mathrm{diag}(\boldsymbol{\beta}_j)\boldsymbol{\psi}.$$

[0101] 由此可以将有源RIS波束赋形问题写为:

[0102] $$\max_{\boldsymbol{W}}\ \mathrm{Re}\{\boldsymbol{\psi}^H\boldsymbol{v}\} - \boldsymbol{\psi}^H\boldsymbol{Q}\boldsymbol{\psi}$$

[0103] s.t.C_2:$\boldsymbol{\psi}^H\boldsymbol{R}\boldsymbol{\psi} \le \tilde{P}_{RIS}^{max}$

[0104] C_3,C_4,

[0105] 其中:

[0106] $$\boldsymbol{Q} = \sum_{k=1}^{K}\left(|v_k|^2\sigma_z^2\mathrm{diag}(\boldsymbol{f}_k \odot \boldsymbol{f}_k^*) + \eta\xi\mathrm{diag}(\boldsymbol{\beta}_k \odot \boldsymbol{\beta}_k^*)\right) + \sum_{k=1}^{K}|v_k|^2\sum_{j=1}^{K}\mathrm{diag}(\boldsymbol{\beta}_j^*)\boldsymbol{f}_k\boldsymbol{f}_k^H\mathrm{diag}(\boldsymbol{\beta}_j) + \eta\zeta\sigma_z^2\boldsymbol{I}_N,$$

[0107] $$\boldsymbol{v} = \sum_{k=1}^{K}\mathrm{diag}(\boldsymbol{f}_k^H)\left(2\sqrt{1+\mu_k}v_k^*\boldsymbol{\beta}_k - |v_k|^2\sum_{j=1}^{K}\alpha_{k,j}^*\boldsymbol{\beta}_j\right),$$

[0108] $$\boldsymbol{R} = \sum_{k=1}^{K}\mathrm{diag}(\boldsymbol{\beta}_k \odot \boldsymbol{\beta}_k^*) + \sigma_z^2\boldsymbol{I}_N.$$

[0109] 同样地,这是一个标准的QCQP问题,因此可以被现有的方法解决。

[0110] 最后考虑到约束C_3和C_4,最优相移控制Θ^{opt}和最优放大系数a^{opt}分别为:

[0111] Θ^{opt}=diag(exp(jarg(ψ^{opt}))),

[0112] $a^{opt}=\Gamma^{-1}diag(exp(-jarg(\psi^{opt})))\psi^{opt}$,

[0113] 其中Γ^{-1}表示矩阵Γ的伪逆。

[0114] 通过以上预编码方法,本发明提供的子连接有源RIS结构能够有效解决有源RIS由于引入大量有源放大电路而带来的高功耗问题,相比传统全连接结构,子连接结构可以获得22%的能效提升,如图4所示,验证了本发明提供的子连接结构可作为有源RIS的一种高能效实现方式。

[0115] 下面对本发明提供的低功耗的智能超表面硬件结构的预编码装置进行描述,下文描述的低功耗的智能超表面硬件结构的预编码装置与上文描述的低功耗的智能超表面硬件结构的预编码方法可相互对应参照。

[0116] 图5是本发明提供的低功耗的智能超表面硬件结构预编码装置的结构示意图,如图5所示,该低功耗的智能超表面硬件结构的预编码装置包括:分配模块501和处理模块502。其中,分配模块501用于基于预调节每一相移电路的相位以及每一放大电路的放大系数,以实现波束赋形的预编码;处理模块502用于以基站和RIS的最大功率为约束条件,确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果,作为对应的预编码方案;其中,所述系统为用户终端、RIS和基站构成的系统。

[0117] 本发明实施例提供的装置实施例是为了实现上述各方法实施例的,具体流程和详细内容请参照上述方法实施例,此处不再赘述。

[0118] 图6是本发明提供的电子设备的结构示意图,如图6所示,该电子设备可以包括:处理器(processor)601、通信接口(Communications Interface)602、存储器(memory)603和通信总线604,其中,处理器601,通信接口602,存储器603通过通信总线604完成相互间的通信。处理器601可以调用存储器603中的逻辑指令,以执行低功耗的智能超表面硬件结构,该方法包括:基于预调节每一相移电路的相位以及每一放大电路的放大系数,以实现波束赋形的预编码;以基站和RIS的最大功率为约束条件,确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果,作为对应的预编码方案;其中,所述系统为用户终端、RIS和基站构成的系统。

[0119] 此外,上述的存储器603中的逻辑指令可以通过软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用时,可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解,本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品存储在一个存储介质中,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备等)执行本发明各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括:U盘、移动硬盘、只读存储器(ROM,Read-Only Memory)、随机存取存储器(RAM,Random Access Memory)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0120] 另一方面,本发明还提供一种计算机程序产品,所述计算机程序产品包括存储在非暂态计算机可读存储介质上的计算机程序,所述计算机程序包括程序指令,当所述程序指令被计算机执行时,计算机能够执行上述各方法所提供的低功耗的智能超表面硬件结构,该方法包括:基于预调节每一相移电路的相位以及每一放大电路的放大系数,以实现波束赋形的预编码;以基站和RIS的最大功率为约束条件,确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果,作为对应的预编码方案;其中,所述系统为用户

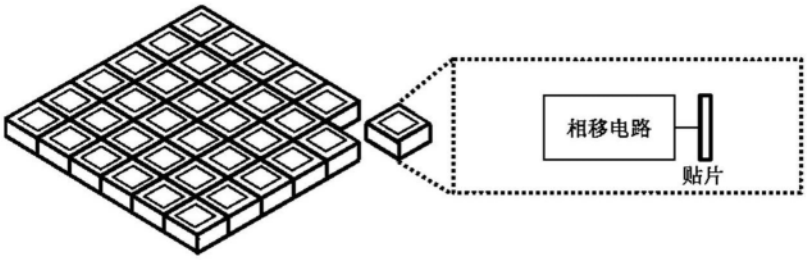
终端、RIS和基站构成的系统。

[0121] 又一方面,本发明还提供一种非暂态计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该计算机程序被处理器执行时实现以执行上述各实施例提供的低功耗的智能超表面硬件结构,该方法包括:基于预调节每一相移电路的相位以及每一放大电路的放大系数,以实现波束赋形的预编码;以基站和RIS的最大功率为约束条件,确定使系统能效最大化的所有相移电路的相位和放大电路的系数的调节结果,作为对应的预编码方案;其中,所述系统为用户终端、RIS和基站构成的系统。

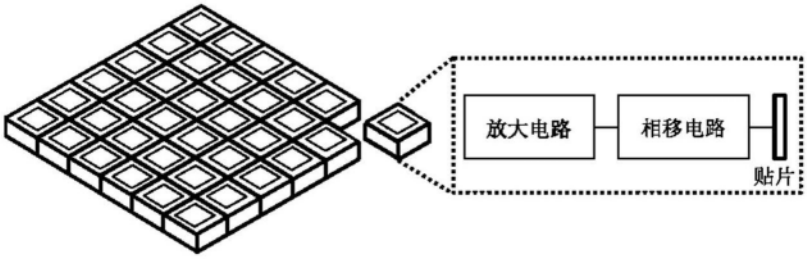
[0122] 以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的,其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的,作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元,即可以位于一个地方,或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。本领域普通技术人员在不付出创造性的劳动的情况下,即可以理解并实施。

[0123] 通过以上的实施方式的描述,本领域的技术人员可以清楚地了解到各实施方式可借助软件加必需的通用硬件平台的方式来实现,当然也可以通过硬件。基于这样的理解,上述技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品可以存储在计算机可读存储介质中,如ROM/RAM、磁碟、光盘等,包括若干指令用以使得一台计算机设备(可以是个人计算机,服务器,或者网络设备等)执行各个实施例或者实施例的某些部分所述的方法。

[0124] 最后应说明的是:以上实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。



（a）无源RIS



（b）全连接有源RIS

图1

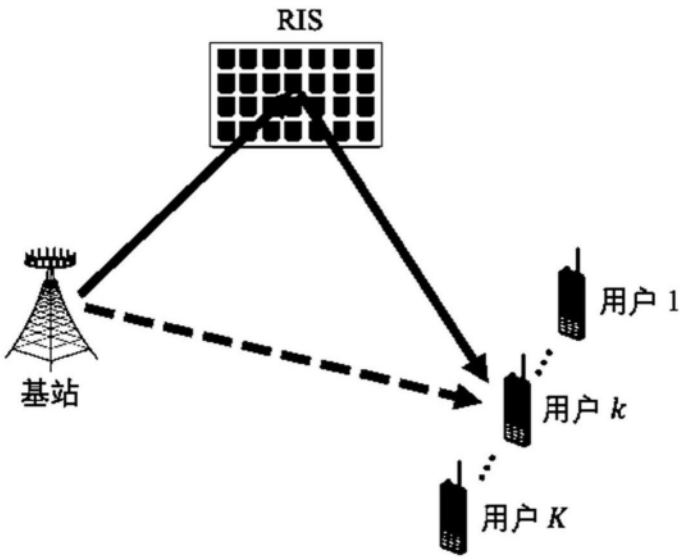


图2

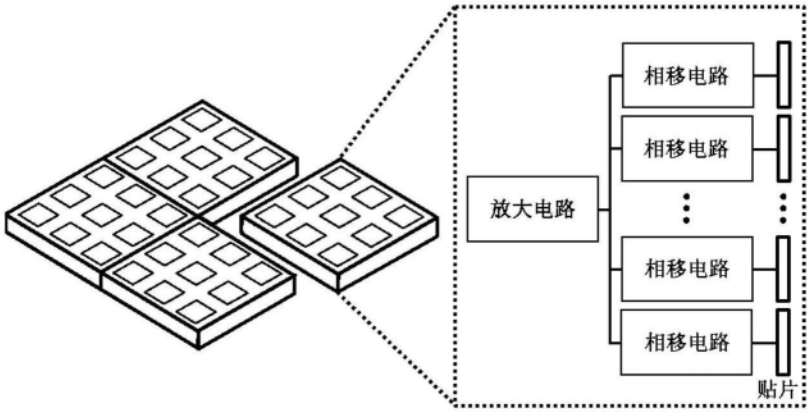

相移电路
相移电路
放大电路
相移电路
相移电路
贴片

图3

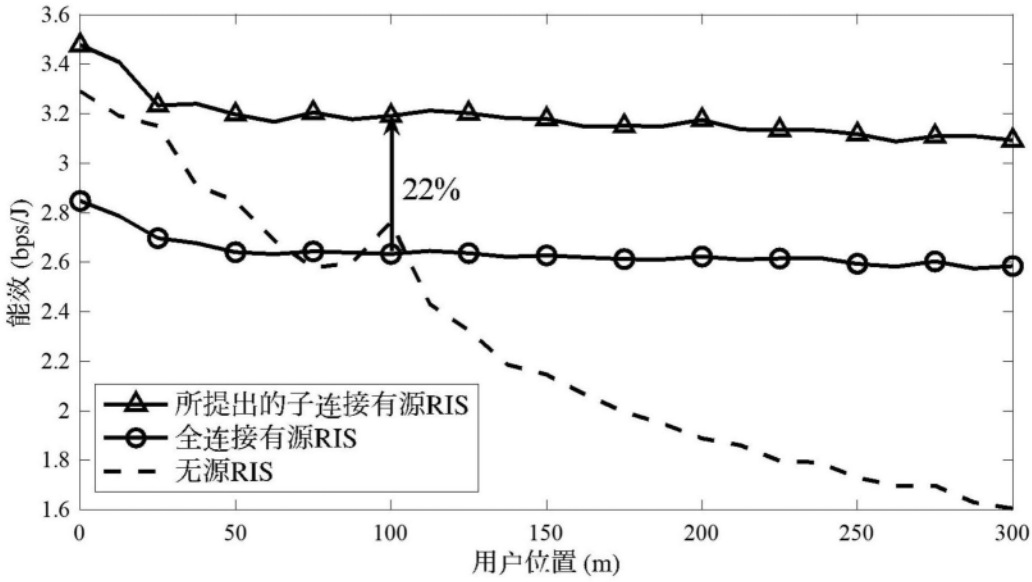

3.6
3.4
3.2
3
2.8
2.6
2.4
2.2
2
1.8
1.6
能效 (bps/J)
22%
所提出的子连接有源RIS
全连接有源RIS
无源RIS
0
50
100
150
200
250
300
用户位置 (m)

图4

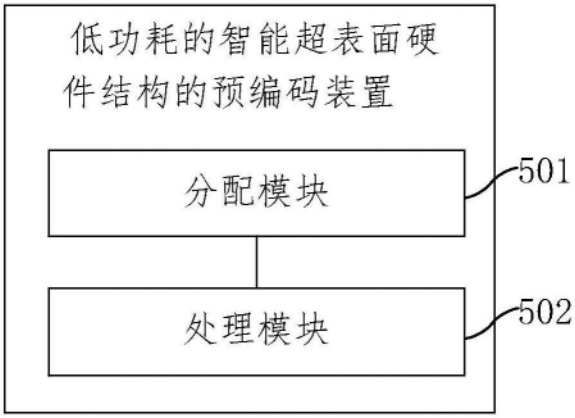

低功耗的智能超表面硬件结构的预编码装置
分配模块
501
处理模块
502

图5

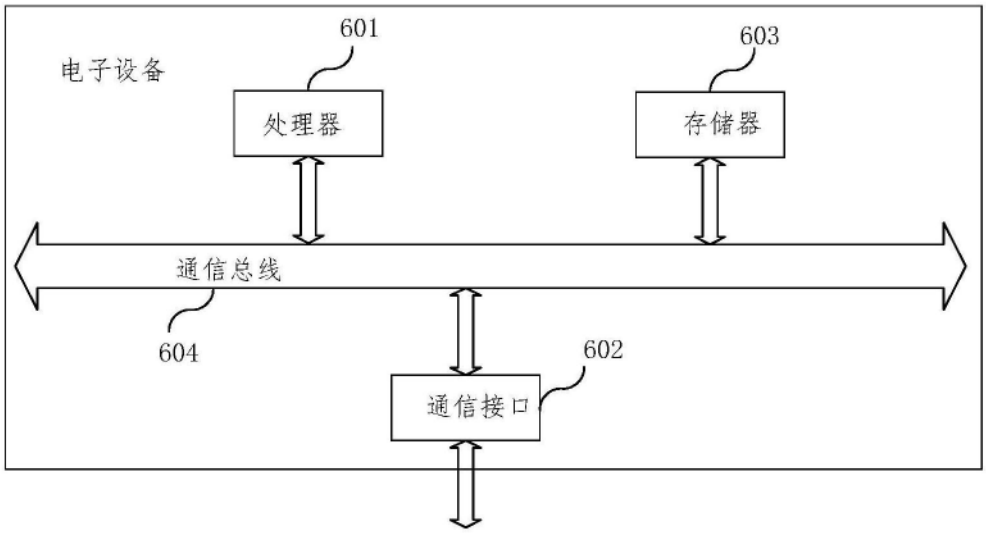


图6